

平成 21 年 6 月 22 日現在

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2008
 課題番号：19360289
 研究課題名（和文） 高性能高温超伝導複合体開発のための機械—電磁気特性の基礎的研究
 研究課題名（英文） Basic study of mechano-electromagnetic properties and development of high performance HTc superconducting composites.
 研究代表者
 長村 光造 (osamura kozo)
 財団法人 応用科学研究所・理事
 研究者番号：50026209

研究成果の概要：

YBCO, BSCCO 高温超伝導複合線の機械的性質および機械—電磁気学的特性を室温及び 77K において調べた。さらに中性子および放射光により複合体中の超伝導層に生ずる残留歪を計測し、その臨界電流特性への影響を複合則に基づく理論モデルにより解析した。これらの結果より臨界電流の歪依存性および耐脆性破断に優れた実用複合超伝導線材の開発に必要な材料設計の指針を提案することができた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	12,600,000	3,780,000	16,380,000
2008 年度	3,100,000	930,000	4,030,000
年度			
年度			
年度			
総計	15,700,000	4,710,000	20,410,000

研究分野：工学科研費の分科・細目：材料工学・金属物性キーワード：金属物性・省エネルギー・超伝導材料・中性子回析・機械的性質

1. 研究開始当初の背景

今後人類が直面するエネルギー危機の解決のため、超伝導技術は最重要キーテクノロジーのひとつであり、これまで大容量送電ケーブル、エネルギー貯蔵、超電導発電機等のプロトタイプが作製されその適用性が実証されてきた。しかしこれら超伝導技術の真の実用化にはまだ克服すべき広範でかつ共通する材料科学的技術的課題が立ち塞がっている。その根本には高臨界電流、低交流損失、高強度の 3 大機能を最適化した高性能・低コスト超伝導複合体の設計とその実用化にか

かっている。

とくに機械的性質およびその超伝導特性への影響は 3 大機能に大きく関係するので、その懸案の解決は緊急を要するものである。とくに $(\text{Bi}, \text{Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (BSCCO) テープ線材については①臨界電流の歪依存性の観点からは Nominal fracture strain の値をいかに大きくするか。②複合体の高強度化の観点からは銀合金層 ($i = 3$) をいかに強化するか、あるいは補強層に取り替えることにより $dR/d\varepsilon$ の勾配、すなわち複合体のヤング率を

いかに高めるか、しかし超伝導層のNominal fracture strain の値を小さくさせない複合構造を考案すること等が具体的な研究課題となっている。ReBa₂Cu₃O_{6+d} (REBCO)被覆導体(coated conductor)においては①臨界電流最大の観点からは真性歪がゼロに対応するForce free strain の値をいかに大きな値にするか。② また臨界電流の歪依存性の観点からは、劣化が始まるNominal fracture strainの値をいかに大きくするか。③複合体の高強度化の観点からは基板層(i = 2)をいかに強化するか、あるいは補強層を取り替えることにより複合体のヤング率をいかに高めるか、しかし超伝導層のNominal fracture strain の値を小さくさせない複合構造を考案する等が研究課題となっている。

これらの懸案の解決とともに、研究をとおして新しい研究手法を確立することは、将来新しい複合線材を設計するため材料構成の変更が求められるとき、その複合構造にどのような残留歪が発生し、それが機械特性、超伝導特性に影響するかを定量的に予測することができるようになる。近い将来、引張強度が 300MPa 以上、かつ臨界電流が 300A 以上で、不可逆歪が 0.5%以上、交流損失が最小化といった実用線材の実現が期待されているが、本研究の成果はこのような材料設計に重要な役割が演じられると考えられる。

2. 研究の目的

① 低温で測定可能な残留歪を測定するための中性子回折実験システムを整備し、超伝導複合体中の残留歪を測定する方法を確立する。これにより内部残留歪を直接決定するとともにヤング率(E)、熱膨張係数(CTE) およびそれらの異方性等を格子定数の精密測定から明かにする。

② 機械—電磁気物性、特に室温および液体窒素温度での応力—歪の関係を求め、ヤング率、弾性限、耐力等を決定するとともに、臨界電流の歪依存性を明かにする。

③ 超伝導複合体の機械—電磁物性を解析するモデルを実験データとの比較から改良し、工学的臨界電流密度、臨界電流の歪依存性、力学特性を最適化する複合超伝導体の材料設計方法を構築する。

以上要するに本研究の目的は機械—電磁気物性の基礎的研究をもとに歪を制御した高性能な BSCCO テープ線材、YBCO 被覆導体製造の指針を提案することである。

3. 研究の方法

BSCCOテープおよびYBCOテープ線材について液体窒素温度で引張応力下において臨界電流測定を行う。とくに応力の負荷、除荷による臨界電流の可逆性から不可逆性が始まる不可逆歪(A_{irr})と応力(R_{irr})及び臨界電流が 99%までに減少したときの歪($A_{99\%}$)と応力($R_{99\%}$)を求める。これより弾性領域における臨界電流の歪依存性 $I_c(A)$ を定量化するとともに、不可逆歪と耐力の相関を考察する。ヤング率(E)、熱膨張係数CTE(α)、密度等およびその温度依存性の正確な値は材料設計に不可欠であり、とくに複合体中では $\Delta\alpha = (\alpha - \alpha_i)$ のようにみかけの熱膨張係数 $\Delta\alpha$ が臨界電流密度の真性歪効果では重要な振る舞いを示す。本研究で開発する光学式熱膨張係数測定装置を用いて熱膨張係数を測定し、計算に反映させる。これらをふまえて機械—電磁物性の実験から作製条件の異なるBSCCO線材およびYBCOテープ線材におけるforce free strainと臨界電流の歪依存性の関連を解明する。JAEA東海研究所の中性子残留歪測定施設RESAに新たに構築する極低温引張試験装置で77 Kにおける超伝導層中の残留歪を直接測定する。またSpring8において放射光により残留歪を測定する。この実測値を基礎により改良されたモデルを構築する。これにより材料の段階から工業的臨界電流密度、臨界電流の耐歪依存性、機械的特性等を任意に精度よく推定できるようになるので、これより材料メーカーに臨界電流の劣化の少ない、より高い臨界電流をもつ、かつ高強度な材料にはどのような線材の複合構造であれば良いか提案する。

4. 研究成果

4.1 装置開発

日本原子力研究開発機構の JRR-3 原子炉導管にある中性子回折歪測定設備(RESA)に極低温で実験可能な引張試験装置を開発設

置した[論文 1-1]。すなわち断熱を向上させるため 2 重容器にしたアルミ製容器を 2 段 GM 冷凍機で冷却するようにした (図 1)。10kN まで荷重を印加可能な荷重フレームを容器内に挿入し、ロードセルと荷重ドライブは室温に置くようにした。荷重フレームの最低温部分に試料チャックが位置するようにした。チャック間距離は標準 100mm とした。試料温度制御には冷凍機による冷却とチャック部分に取り付けたヒータとのバランスで行った。実際には冷凍開始から 2 時間で 14K まで下がり、さらに 8 時間後には 4.8K に到達した。本装置を用いて低温において BSCCO、YBCO テープについて荷重負荷中の超伝導層の格子定数の精密測定に成功した。

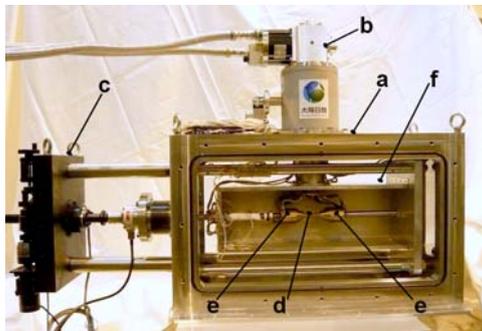


図 1 開発した極低温引張試験機

4.2 BSCCO テープについての成果

BSCCO テープ線材について室温および 77K において応力-歪の関係を Nyilas 型対称歪計を用いて正確に計測し、ヤング率、弾性限、耐力、引張強度、破断歪を試料毎に整理した。これらのデータを用いて複合則を基本とする解析モデルにより、force free strain および超伝導層の nominal fracture strain を推定した。77K で引張応力下において臨界電流測定を行い、とくに応力の負荷、除荷による臨界電流の可逆性から不可逆性が始まる不可逆歪 (A_{irr}) と応力 (R_{irr}) 及び臨界電流が 99% までに減少したときの歪 ($A_{99\%}$) と応力 ($R_{99\%}$) を求めた。これより弾性領域における臨界電流の歪依存性 $I_c(A)$ を定量化するとともに、不可逆歪と耐力の相関を考察した。

JAEA 東海研究所で中性子残留歪測定装置でまず室温で超伝導層中の残留歪を直接測定した[論文 1-2]。計算で求められる熱残留歪と

の比較から SUS あるいは Brass でラミネートしたテープ論文 2-1, 2-2[] では超伝導層中の残留歪は予測される熱残留歪より大きいことが明らかとなった。これは補強効果により局所的な破断の確率が減ったためであると結論付けされた[論文 2-3]。

4.3 YBCO テープについての成果

JAEA の RESA に新たに設置した低温引張試験機を用いて、5K~77K の温度範囲で YBCO coated conductors について引張試験を行うと同時に中性子回折により YBCO 超伝導層、金属基板、ラミネート層の局所歪を測定した。一方同一試料について引張荷重下で臨界電流測定を行った。得られた結果を整理し、負荷歪に対する各成分中の局所歪がどのように変化するかを明らかにした。特に超伝導層中の局所歪は圧縮成分から引張成分に変化し、臨界電流の歪依存性との関係にきわめて興味深い知見が得られた。

試料は Cu を電着した YBCO coated conductor で、Hastelloy 基板の上にバッファー層を介して厚さ約 1 μ m の YBCO 層、さらに Ag 層が積層した構造をしており、ここでは幅 4mm(SCS4050)を用いた。液体窒素温度で臨界電流の歪依存性の測定を行うとともに、JAEA JRR-3 の RESA に今回新しく設置した中性子回折測定用低温引張試験機[論文 1-1]を用いて、低温において一軸引張荷重下における局所歪の測定を行った。

77K で図中に示す一軸引張応力を与えて測定した YBCO の (020) および (200) 回折面のプロファイルを調べると、応力が増加するとピーク値は低角側へシフトし、2つのピークの強度比が変化することが明らかとなった。この強度比の変化は応力に対して可逆性があり、応力誘起に関連した興味ある現象である。

種々の温度における (020) 面間隔の歪依存性を調べると面間隔は印加した歪に比例し、温度とともに面間隔は増加することがわかった。同一試料について室温測定では YBCO 層に 0.20% の圧縮歪が存在することを明らかにしてきた。また YBCO の熱膨張係数を 9.2 ppm/K とすると 77K での標準状態の (020), (200) 面間隔の値を室温でのテープ材が無歪にあった時の測定値から推定することができた。77K で YBCO テープ中に

は圧縮の残留歪が存在し、引張歪の増加とともに、圧縮歪は小さくなり、force free strain (A_{ff})は 0.26%となり、理論的な予測値[論文 3-1]の 0.26%に一致した。一方臨界電流の最大は $A=0.035\%$ に存在し、従来の臨界電流最大はforce free strain に一致するという考え方は成立しないことが明らかとなった。

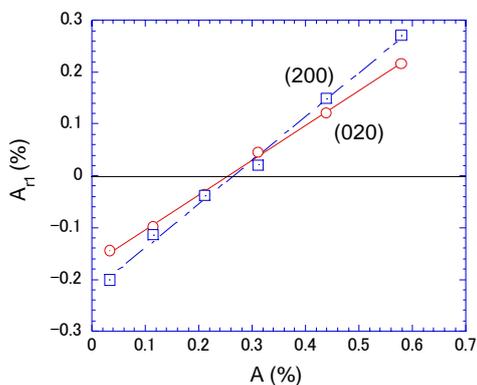


図2 77KにおけるYBCO c.c.中の超伝導層にかかる残留歪の印加歪依存性

4.4 研究成果にもとづく提言

今後の工学的目的から、超電導線は一般的に小さな断面積であるが、1 km に及ぶ長尺の線として使われる。しかも長尺にわたりその複雑な複合構造も外形的形態も均質で、超電導特性並びにその他の性質においても均質でなければならない。一般に均質さ、一定さの評価については平均値からの分散あるいは不確定さが実験的に求められる指標となる。不均質さには統計的なものと、偶発的なものがある。BSSCO 線材でいえば、非超電導相や配向性等は空間的に分布し、それが結果的に臨界電流密度の分散に影響する。一方窒素ガスのバブリングは非常に稀に観察される。前者の統計的な不均質さについては、どの程度の範囲にわたり検査すれば超電導線全体の特徴を代表するかはワイブル統計分布の概念を適用することにより理論的に明かにされ、それに従い試験することが求められる。原因となる微視的構造を分析し、統計データとの相関を調べることが、製造工程の改善の近道になるのではないかと考えられる。

超電導線材の3大機能として、工学的臨界電流密度、機械特性等はかなり実用化に近いレベルに達しつつある。一方交流損失については、その低減について種々の提案がなされているが、長尺線の実現にはまだ時間がかかるようである。もう少しこの分野に研究資源を集中して解決をはかることが、超電導技術全体の発展に必須のことのように思われる。Nb-Tiを除いて、すべての工学的超電導材料は金属間化合物あるいは酸化物等であり、非常に脆性的である。これを金属基材と複合化して、その欠点を克服しようとしているわけである。本解説でも機械的にどの程度で劣化するか、たとえば可逆限界歪を定義し、その共通の測定方法で各種超電導材料を評価してきた。このような客観的な特性の比較は工学的応用のために材料を選択するため重要である。さらに超電導電力応用技術が地球環境問題への対応およびエネルギーセキュリティの確保に対して貢献できる技術となるためには、経済活動における技術的手段として選択される必要がある。すなわち、性能はもとより経済的側面においても魅力的であることが必要不可欠である。とくに超電導線材の特性が、従来の銅と鉄の特性を活用した電力機器を大きく凌駕する魅力がなければ、超電導技術の導入と浸透は難しい。個別の電力機器において超電導線材に求められる条件はそれぞれに異なるので、それらの使用条件で特性が最大限発揮できるかを意識しつつ開発し、それを明示することが必要である。たとえば、どの程度の工学的臨界電流密度とその対歪特性が必要か、過剰な仕様を求めるのではなく、適正な範囲の仕様を基準に、総合的に超電導材料を選択することが、今後は求められると考えられる。そのためには評価方法の標準化、データの系統的な収集といったことの必要性が高まるものと考えられる[論文 3-5]。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 10 件)

1) 装置開発

1-1) Y. Tsuchiya, H. Suzuki, T. Umeno, S. Machiya and K. Osamura, Development of cryogenic load frame for neutron diffractometer, to be published in Measurement Science and Technology.

1-2) S Machiya, K Osamura, H Suzuki, T Kato, N Ayai, K Hayashi and K Kato; In situ strain measurements by neutron diffraction and residual stress estimation in Ag-sheathed Bi2223 superconducting composite tapes, Supercond. Sci. Technol. 21,5 (2008) 054007-054012

2) BSCCO テープ

2-1) Kikuchi M. Ayai N. Goro O. Fujikami J. Kobayashi S. Ueno E. Yamazaki K. Yamade S. Ishida T. Tatamidani K. Sato K. Hata R. Ihara J. Yamaguchi K. Kumakura H. Kitaguchi H. Osamura K. Shimoyanagi J.

High performances DI-BSCCO® (Dynamically Innovative BSCCO) wire and its applications, Proceedings of ICEC22 — ICMC (2008) 1001-1006

2-2) Ayai N, Kato K, Fujikami J, Kobayashi S, Kikuchi M, Yamazaki K, Yamade S, Ishida T, Tatamidani K, Hayashi K, Sato K, Hata K, Kitaguchi H, Kumakura H, Osamura K and Simoyama J

DI-BSCCO Wire with I_c over 200 A at 77K, Journal of Physics, 97 (2008) 012112-012117

2-3) K Osamura, S Machiya, H Suzuki, S Ochiai, H Adachi, N Ayai, K Hayashi and K Sato; Improvement of Reversible Strain Limit for Critical Current of DI-BSCCO due to Lamination Technique, To be published in Applied Supercond, IEEE(2008)

3) YBCO テープ

3-1) Kozo Osamura, Michinaka Sugano, Shytaro Machiya, Hiroki Adachi,

Shojiro Ochiai and Masugu Sato
Internal Residual Strain and Critical Current Maximum of Surrounded Cu Stabilized YBCO Coated Conductor, Supercond. Sci. Technol. 22(2009) 65001-065006

3-2) Sugano M, Machiya S, Osamura K, Adachi H, Sato M, Semerad R and Prusseit W, The direct evaluation of the internal strain of biaxially textured YBCO film in a coated conductor using synchrotron radiation, Supercond. Sci. Technol. 22 (2009) 015002-051008

3-3) Osamura K, Sugano M, Nakao K, Siohara Y, Ibi A, Yamada Y, Nakashima N, Nagaya S, Saitoh T, Iijima Y, Aoki Y, Hasegawa T, and Kato T., Reversible Strain Limit of Critical Currents and Universality of Intrinsic Strain Effect For REBCO Coated Conductors, Supercond. Sci. Technol. 22 (2009) 025015-025021

3-4) Osamura K, Sugano M, Nakao K, Siohara Y, Ibi A, Yamada Y, Nakashima N, Nagaya S, Saitoh T, Iijima Y, Aoki Y, Hasegawa T, and Kato T., REVERSIBLE STRAIN LIMIT OF CRITICAL CURRENTS AND THEIR UNIVERSAL ELASTIC STRAIN EFFECT FOR REBCO COATED CONDUCTORS FABRICATED BY DIFFERENT TECHNIQUES, Proceedings of ICEC22 – ICMC (2008) 971-976

3-5) 長村光造、和田仁、落合庄治郎、北條正樹、松下照男、和田調、菅野未知央、町屋修太郎、D.Larbalestier、A.Nyilas、W.Prusseit、A.Otto、D.Hampshire ;
高温超電導材料の電磁氣的・機械的特性の評価, 低温工学 44 卷 4 号 2009 年 146-158

[学会発表] (計 11 件)

1) 装置開発

1-1) 土屋佳則、鈴木裕土、梅野高裕、町屋修

太郎、長村光造；

中性子回折測定用低温引張試験機の開発
第 80 回 2009 年度春季低温工学・超電導学
会講演概要集 133

1-2) ハルヨ ステファヌス、相澤一也、伊藤崇芳、
新井正敏、辺見努、松井邦浩、鈴木裕士、長
村光造、町屋修太郎、土屋佳則、淡路智、
小黒英俊、西島元；

工学材料回折装置「匠」および実用超伝導
コンポジットへの応力・ひずみの影響

第 80 回 2009 年度春季低温工学・超電導学
会講演概要集 48

2) BSCCO テープ

2-1) 町屋修太郎、長村光造、鈴木裕士、落
合庄治郎、綾井直樹、林和彦、佐藤謙一；
ラミネート構造を持つ BSCCO の臨界電流
における可逆的ひずみ限界の改善とその非
破壊的評価法

第 79 回 2008 年度秋季低温工学・超電導学
会講演概要集 15

2-2) 長部吾郎、綾井直樹、藤上純、山崎浩
平、菊地昌志、長村光造、北條正樹、大澤
健太；

銅合金をラミネートした DI-BSCCO 線材
の機械特性

第 78 回 2008 年度春季低温工学・超電導学
会講演概要集 72

2-3) 大澤健太、北條正樹、長村光造、綾井
直樹；

3ply-DI-BSCCO テープ中の BSCCO フィ
ラメント破断ひずみの増大

第 78 回 2008 年度春季低温工学・超電導学
会講演概要集 68

3) YBCO テープ

3-1) 長村光造、町屋修太郎、土屋佳則、鈴
木裕士；

YBCO C. C. の低温引張と中性子回折によ
る内部歪変化のその場測定

第 80 回 2009 年度春季低温工学・超電導学
会講演概要集 112

3-2) 町屋修太郎、長村光造、鈴木裕士、ハルヨ ス
テファヌス、伊藤崇芳、土屋佳則；

パルス中性子を用いた高温超伝導テープ線
材のひずみ測定

第 80 回 2009 年度春季低温工学・超電導学
会講演概要集 8

3-3) 菅野未知央、崔世鎔、伊藤喜久男、
木吉司、宮副照久、宮松和浩、安藤努、和
田仁、長村光造、Werner Prusseit；

RE123 線材における超伝導特性に及ぼす応
力・ひずみ効果—引張・圧縮試験による評
価 第 78 回 2008 年度春季低温工学・超電
導学会講演概要集 190

3-4) 松下照男、磯部現、木内勝、長村光造、
Werner Prusseit；

引っ張り歪による DyBCO コート線材の塑
性変形についての電磁気学的考察

第 78 回 2008 年度春季低温工学・超電導学
会講演概要集 185

3-5) 長村光造、菅野未知央、町屋修太郎、
足立大樹、佐藤優、落合庄治郎、Xie
Yi-Yuan；

YBCO 導体における超電導層中の局所歪

第 79 回 2008 年度秋季低温工学・超電導学
会講演概要集 108

3-6) 長村光造、和田仁、落合庄治郎、松下
照男、秋田調；

高温超電導複合体の実用化への要因とその
材料化学的検討

第 78 回 2008 年度春季低温工学・超電導学
会講演概要集 184

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長村 光造

(財) 応用科学研究所・研究部・名誉教授
研究者番号：50026209

(2) 研究分担者

鈴木 裕士

(独) 日本原子力研究開発機構・量子ビー
ム応用研究部門・研究員

研究者番号：10373242

町屋 修太郎

大同大学・機械工学科・講師

研究者番号：40377841

(3) 連携研究者